

航空航天装备

基于机器学习的电热防除冰表面温度变化趋势预测

冉林, 熊建军, 赵照, 左承林, 易贤

(中国空气动力研究与发展中心 结冰与防除冰重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对飞机部件周期控制律电加热防除冰的应用, 提出基于机器学习以预测电加热防除冰表面温度的变化趋势。依靠大型结冰风洞及其电加热防除冰控制系统完成防除冰试验, 获得有效的试验数据, 以通、断电周期为分割单元, 将试验数据划分成验证集和训练集。根据电热防除冰过程的换热情况, 构建样本的特征参数, 利用机器学习的有监督学习方式, 选择KNN近邻回归算法和局部线性加权回归算法预测温度变化率, 再转换为温度, 得到的温度变化与测量数据的线性相关性达到80%以上的高相似度结果, 表明使用机器学习可快速预测电热防除冰部件的表面温度变化趋势, 且不同的回归算法针对模型不同测温点位置的预测效果存在差异。

关键词: 机器学习; 结冰风洞; 电热防除冰; KNN近邻回归算法; 局部线性加权回归算法

中图分类号: V211.73

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)08-0029-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.08.006

Prediction of Surface Temperature Change Trend of Electric Heating Anti-icing and De-icing Based on Machine Learning

RAN Lin, XIONG Jian-jun, ZHAO Zhao, ZUO Cheng-lin, YI Xian

(Key Laboratory of Icing and Deicing, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

ABSTRACT: For the application of aircraft component cycle control law electric heating anti-icing, this paper proposes to predict the surface temperature change trend of electric heating anti-icing surface based on machine learning. The large-scale icing wind tunnel and its electric heating anti-icing and de-icing control system is used to complete the test, obtain valid test data, and divide the test data into several samples with the on and off cycles as the division unit. According to the heat exchange of the electric heating anti-icing de-icing process, the characteristic parameters of the sample are constructed. The supervised learning method is used to predict and calculate the temperature change rate and convert it to temperature through the K-nearest neighbor regression algorithm and the local linear weighted regression algorithm. The temperature change obtained is the linear correla-

收稿日期: 2021-03-25; 修订日期: 2021-05-08

Received: 2021-03-25; Revised: 2021-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(11472296)

Fund: National Natural Science Foundation of China (11472296)

作者简介: 冉林(1994—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为自动化控制。

Biography: RAN Lin (1994—), Male, Master, Assistant engineer, Research focus: automation control.

通讯作者: 易贤(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞机结冰。

Corresponding author: YI Xian (1977—), Male, Ph.D., Researcher, Research focus: aircraft icing research,

引文格式: 冉林, 熊建军, 赵照, 等. 基于机器学习的电热防除冰表面温度变化趋势预测[J]. 装备环境工程, 2021, 18(8): 029-035.

RAN Lin, XIONG Jian-jun, ZHAO Zhao, et al. Prediction of surface temperature change trend of electric heating anti-icing and de-icing based on machine learning[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(8): 029-035.

tion of the measured data reaches a high similarity result of more than 80%, which indicates that the use of machine learning can quickly predict the change trend of the surface temperature of electric heating anti-icing components, and different regression algorithms have different prediction effects for different temperature measurement points of the model.

KEY WORDS: machine learning; icing wind tunnel; electric heating anti-icing and de-icing; K-nearest neighbor regression algorithm; local linear weighted regression algorithm

飞机电热防除冰是指利用电加热方式使飞机重要部件表面温度保持高于冰点温度,以防止部件表面结冰,或融化与部件接触的冰界面,进而使冰在外力下脱落,避免飞机气动外形遭到破坏的一种防护手段^[1]。电热防除冰的周期性加热方式^[2],具有能耗低、利用率高、加热元件损耗低^[3]等优点,是机载电加热系统常采用的工作方式。处于周期通电状态的电加热系统,若温度随环境变化呈上升趋势,加热元件保持通电就会产生过剩的热量,易造成元件损坏,系统不能正常工作。如果能根据当前状态,提前得到部件的表面温度变化趋势,可有效避免此类危害的发生。因此,对电热防除冰表面温度变化趋势的预测有着重要意义。

飞机电加热防除冰主要涉及防除冰系统设计^[4]、电热防除冰热载荷计算^[5-6]、防除冰部件材料性能探究^[7]等,都是围绕着对象的温度变化来开展,所以对电热防除冰部件表面温度的研究是非常有必要的。文献[8]运用数值计算模拟了某电热防除冰部件供电工作时的热流变化,优化了电热系统的功率分布。文献[9]研究了旋翼电热周期控制律防除冰,比较了不同部件使用不同控制律的应用效果,表明了周期控制律的有效性。文献[10]详细概述了防除冰温度控制系统设计的具体内容。文献[11]运用数值计算,以飞机设计标准和飞行工况作为约束条件,提出了多状态的电加热系统供电功率的优化方法。文献[12]基于焓法模型,对周期控制律电热部件表面温度变化进行了计

算,表明合理的控制律可提升系统的应用效果。上述研究工作中,温度都是通过计算的途径得到的,工程计算精度有待提高,数值计算时间代价较大,也无法对下一时刻的温度进行预测。

文中提出了基于机器学习的电热防除冰表面温度变化趋势的快速预测方法,以电加热模型的结冰风洞试验^[13]为基础,引用机器学习的有监督学习方式^[14-15],随机划分试验数据为训练集和验证集,通过KNN近邻回归^[16]、局部加权回归^[17]两种机器学习算法做温度变化率预测,进而获得温度变化量,并与前项温度求和,组成下一输入特征,以获得连续的预测温度。与实际测量的温度进行对比,验证运用机器学习方法预测飞机电加热部件进行防除冰时表面温度变化趋势的可行性。

1 试验

1.1 试验设备

中国空气动力研究与发展中心 3 m×2 m 结冰风洞^[18-19]是一座闭口回流式高亚音速风洞,主要包括喷雾系统、制冷系统、高度模拟系统、风机动力系统,如图 1 所示。该风洞拥有主试验段、次试验段和高速试验段等 3 种类型试验段,文中选用主试验段来开展电加热防除冰试验。

另外,为满足多种方式电热防除冰试验需要,3 m×2 m 结冰风洞专设有独立的高性能多功能电加

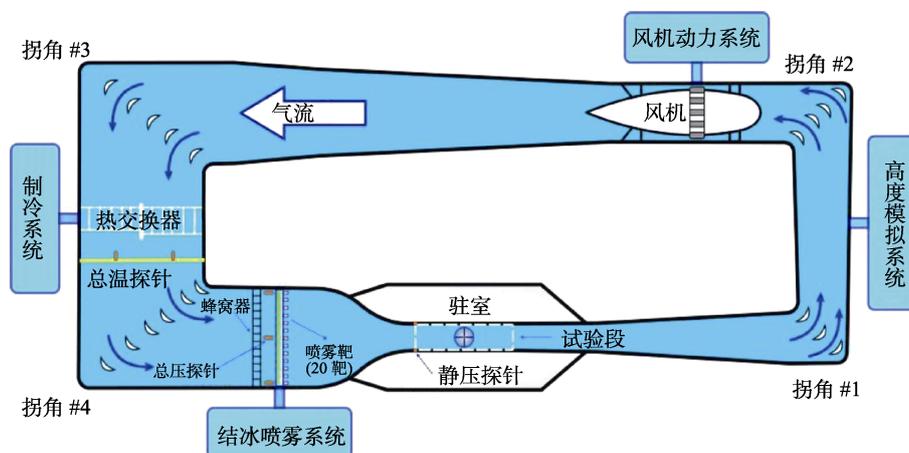


图 1 3 m×2 m 结冰风洞
Fig.1 3 m×2 m icing wind tunnel

热防除冰控制系统^[20]，提供 DC28 V、DC270 V、中频 400 Hz/AC115 V 等实际机载使用的可调电源，接入风洞测控环网，融入整个风洞设备体系，系统结构如图 2 所示。

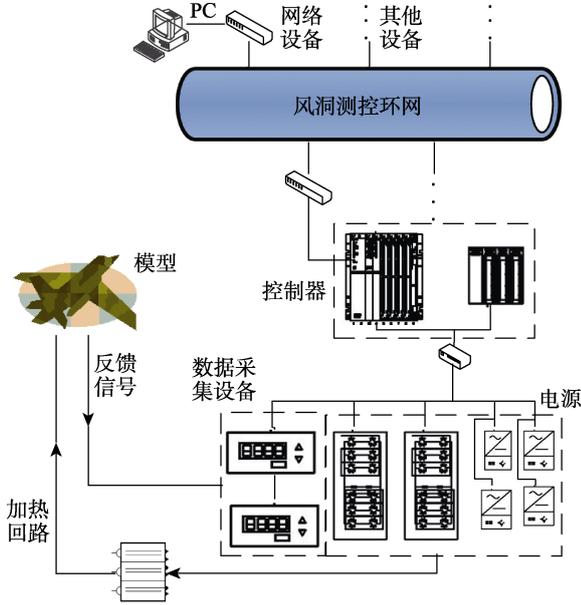


图 2 结冰风洞电加热防除冰控制系统结构

Fig.2 Structure of electric heating anti-icing and de-icing control system for icing wind tunnel

按照电加热操作流程，设计下位机控制器和上位机界面的程序，实现运行状态监视、温度开环控制、温度闭环调压或间断控制、数据采集等功能。其中周期性电加热控制律应用系统的温度开环控制模式，由上位机配置电加热的通、断电延续时间，试验模型的防除冰区域被周期性加热，其表面温度有规律地变化。

1.2 试验模型

此次研究的电加热模型是弦长 350 mm 的螺旋桨，其电加热元件沿前缘展向两侧布置，在同一截面垂直距离间距 2 cm 布置 5 个温度传感器，测量截面的温度分布，传感器的布置如图 3 所示。加热元件附

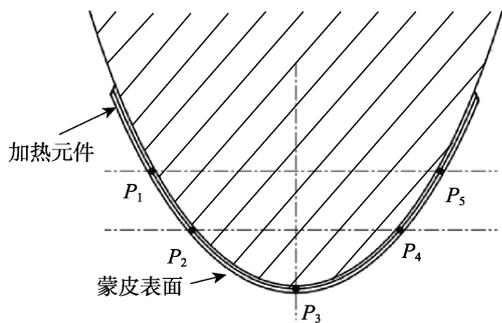


图 3 截面温度传感器布置

Fig.3 Schematic diagram of cross-section temperature sensor arrangement

着于模型前缘两侧，温度传感器埋于蒙皮内侧，温度测量点以 P_3 为中心，左侧 P_1 、 P_2 ，右侧 P_4 、 P_5 。

1.3 试验条件

模型采用周期电加热方式进行试验，单个加热周期为 50 s，其中通电时间为 25 s、断电时间为 25 s。模型电热元件上电输出的电流变化如图 4 所示。共开展了 4 组试验，试验参数主要包括风速 v 、来流温度 θ_∞ 、粒径 d_{MVD} 、液体水含量 ρ_{LWC} ，见表 1。

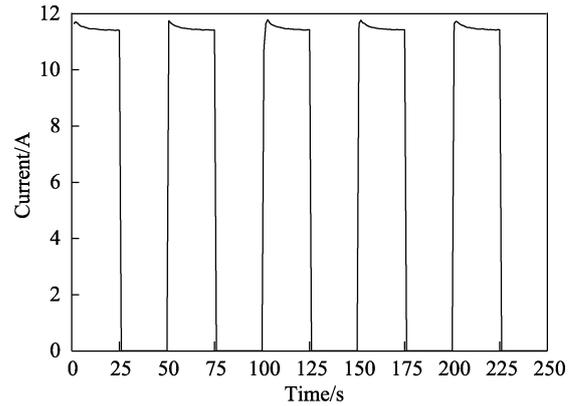


图 4 电热元件通电 25 s、断电 25 s 输出电流变化

Fig.4 The output current changes of the heating element is powered on for 25 s and off for 25 s

表 1 周期电热防除冰试验工况

Tabl.1 Periodic electric heating anti-icing and de-icing test conditions

编号	$v/(m \cdot s^{-1})$	$\theta_\infty/^\circ C$	$d_{MVD}/\mu m$	$\rho_{LWC}/(g \cdot m^{-3})$
①	130	-7.8	20	0.48
②	130	-7.9	30	0.35
③	130	-8.2	40	0.4
④	130	-11.1	20	0.42

1.4 试验结果

表 1 的 4 个条次试验，电加热系统输出如图 4 所示的加热周期，并采集、存储试验相关参数数据以及表面温度数据。模型测温截面 5 个点位温度变化如图 5 所示。

由图 5 可见，截面两侧 P_1 、 P_2 、 P_4 、 P_5 位置的温度变化与电流变化规律一致，通电温度上升，但通电结束后延续约 2 s，因剩余热量，温度仍在上升，然后下降。由于前缘 P_3 位置液态水蒸发量最大，在通电阶段出现温度上升滞后，温度变化呈现无次序上升、下降。

2 表面温度机器学习模型构建

2.1 样本特征参数的构建

此次通过试验得到表面温度数据及相关试验参

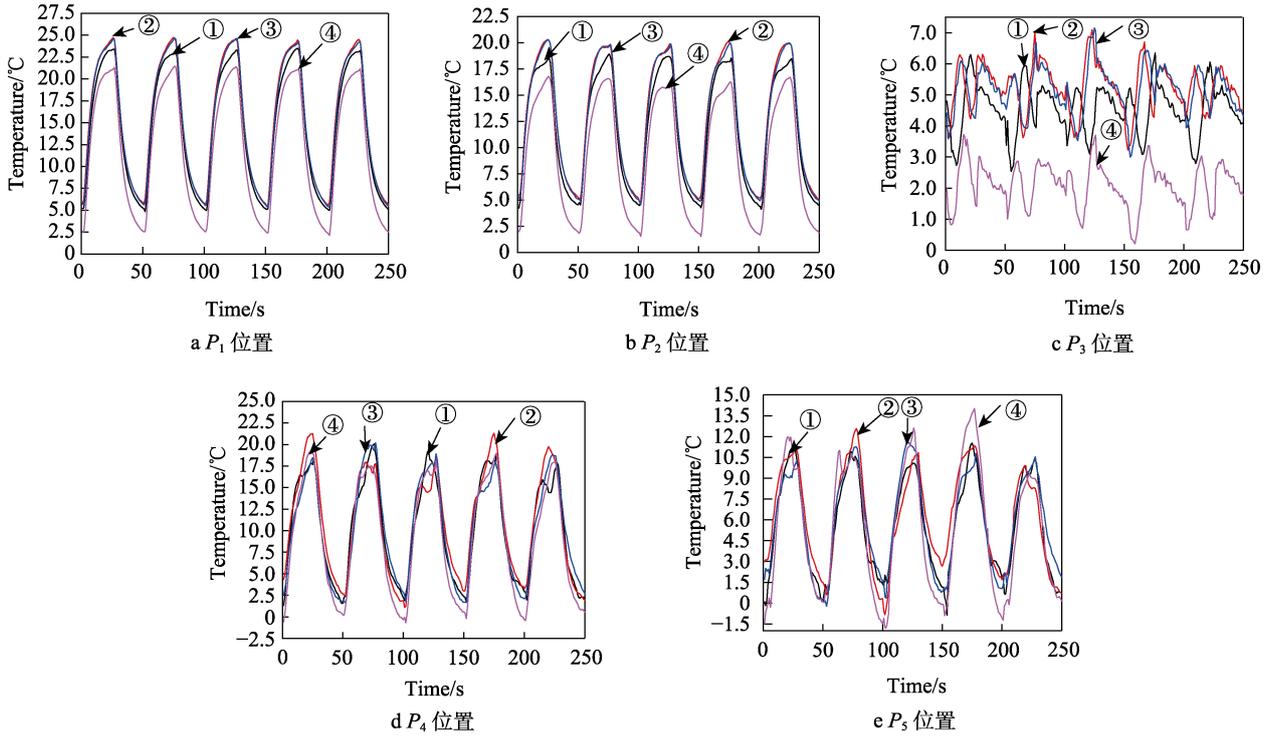


图5 模型测温截面5个点位温度变化

Fig.5 Model temperature measurement cross-section temperature changes at 5 points: a) P_1 position; b) P_2 position; c) P_3 position; d) P_4 position; e) P_5 position

数数据，作为用于机器学习的训练集和验证集。飞机部件在电热防除冰过程中，电加热元件通电提供热源，所产生的热量主要通过加热区域表面的对流换热、液态水蒸发吸热、部件内部热传导以及向周围环境辐射等方式耗散，并在部件表面的温度变化上体现出来，所以表面温度 t_s 与影响其变化的相关参数之间的关系可表示为：

$$t_s = f(v, \theta_\infty, d_{MVD}, \rho_{LWC}, \dots) \quad (1)$$

从能量守恒角度出发，模型表面温度变化量主要与控制律的供电规律、模型表面温度、风洞环境温度相关。定义同一时刻供电电流为 I^t 、表面温度为 θ_s^t 、试验环境温度为 θ_E^t 。因此，表面温度变化率则可表示为：

$$\dot{\theta}_s = f(I^t, \theta_s^t, \theta_E^t) \quad (2)$$

式(2)中：上标 t 指所有变量在 t 时刻的值。引入机器学习的有监督学习方式，将 I^t 、 θ_s^t 、 θ_E^t 作为输入特征，温度变化率 $\dot{\theta}_s$ 作为输出特征，表达式为：

$$\dot{\theta}_s = \frac{\theta_s^{t+1} - \theta_s^t}{\Delta t} \quad (3)$$

式(3)为根据试验所得表面温度数据下一时刻 $t+1$ 与当前时刻 t 的差值来计算温度变化率。

按照通、断电周期，划分试验数据为若干样本，从中选出训练集和学习集，如式(4) — (6)所示：

$$D = \left\{ \left(D_{\text{train}}^i, D_{\text{verify}}^j \right); j \ll i \right\} \quad (4)$$

$$D_{\text{train}}^i = \left\{ \left[\dot{\theta}_s, \left(I^t, \theta_s^t, \theta_E^t \right) \right]^i; t=1, 2, \dots, 50; i=1, 2, \dots, n \right\} \quad (5)$$

$$D_{\text{verify}}^j = \left\{ \left[\dot{\theta}_s, \left(I^t, \theta_s^t, \theta_E^t \right) \right]^j; t=1, 2, \dots, 50; j=1, 2, \dots, n \right\} \quad (6)$$

式(4)为总体样本，式(5)为训练集样本，式(6)为验证集样本。根据表面温度变化率的特征参数关系式，通过监督学习算法对训练集样本分析推算，得到输入、输出特征之间的映射函数：

$$f: \left(I^t, \theta_s^t, \theta_E^t \right) \rightarrow \theta_s^{t+\Delta t} \quad (7)$$

2.2 表面温度的有监督学习方式

由于表面温度变化率是连续的，可将其求解转化为有监督学习中的回归问题，具体流程如图6所示。验证集通过特征参数的映射函数预测表面温度变化率，从而得到其温度变化量。然后与当前时刻 t 的表面温度求和得到下一时刻 $t+1$ 的表面温度，再与另外的输入特征变量组合，进行下一次预测，得到验证集样本的温度变化率预测结果，并转换为温度，从而获得周期电热防除冰表面温度的变化趋势。

其中，回归算法选用局部加权线性回归算法和KNN 近邻回归算法。局部加权线性回归算法是引入高斯核对样本的每个预测点，赋予一定的权重，对训练集样本做线性回归计算，得到其映射函数。所述高斯核函数 W 和回归系数 w 的表达式为：

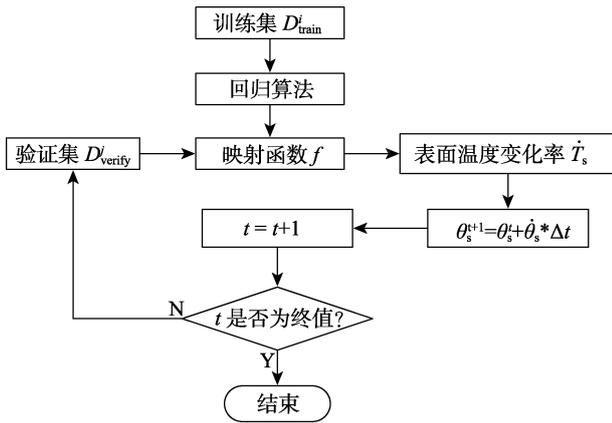


图 6 表面温度有监督学习流程

Fig.6 Supervised learning process of surface temperature variation

$$W(i, i) = \exp\left(\frac{|x_i - x_c|^2}{-2\theta^2}\right) \quad (8)$$

$$w = (X^T W X)^{-1} X^T W Y \quad (9)$$

式(8)中： x_i 为样本的第 i 个点； x_c 为样本的中心点； θ 为超参数，用于调整局部回归加权的“局部范围”。式(9)中， X 、 Y 分别为样本的输入、输出特征矩阵。结合式(8)和式(9)可知，可改变 θ 值来调节算法的回归效果。

KNN 近邻回归算法原理是找出样本的 k 个最近邻居，并将这些邻居的特征平均值赋给该样本，常用欧氏距离作为“相近条件”，表达式为：

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_j)^2}; j \neq i \quad (10)$$

$$X^n = \frac{\sum_{m=1}^k x_m^n}{k} \quad (11)$$

式(10)中： d_i 表示样本中其他点 x_j 与预测点 x_i 的距离。式(11)中， X^n 为预测点的第 n 个特征； x_m^n 为 k 个近邻点中第 m 个点的第 n 个特征。KNN 近邻回归是依据式(10)搜索样本预测点的 k 个近邻点，式(11)则将近邻点的特征作均值处理，作为预测点的特征。

3 预测结果分析及讨论

使用 Pycharm 软件编写 KNN 近邻回归算法和局部加权回归算法程序，导入训练集样本，得到特征参数的映射函数。再对验证集样本进行预测计算，得到温度变化率。再根据前项温度值转换，获得学习样本预测的温度变化。图 7 给出的是控制律通电 25 s、断电 25 s 某一学习样本的表面温度变化预测。图中方形符号线为 KNN 近邻回归算法预测温度变化，三角形为局部加权线性回归算法预测温度变化，圆形为实际测量温度变化。

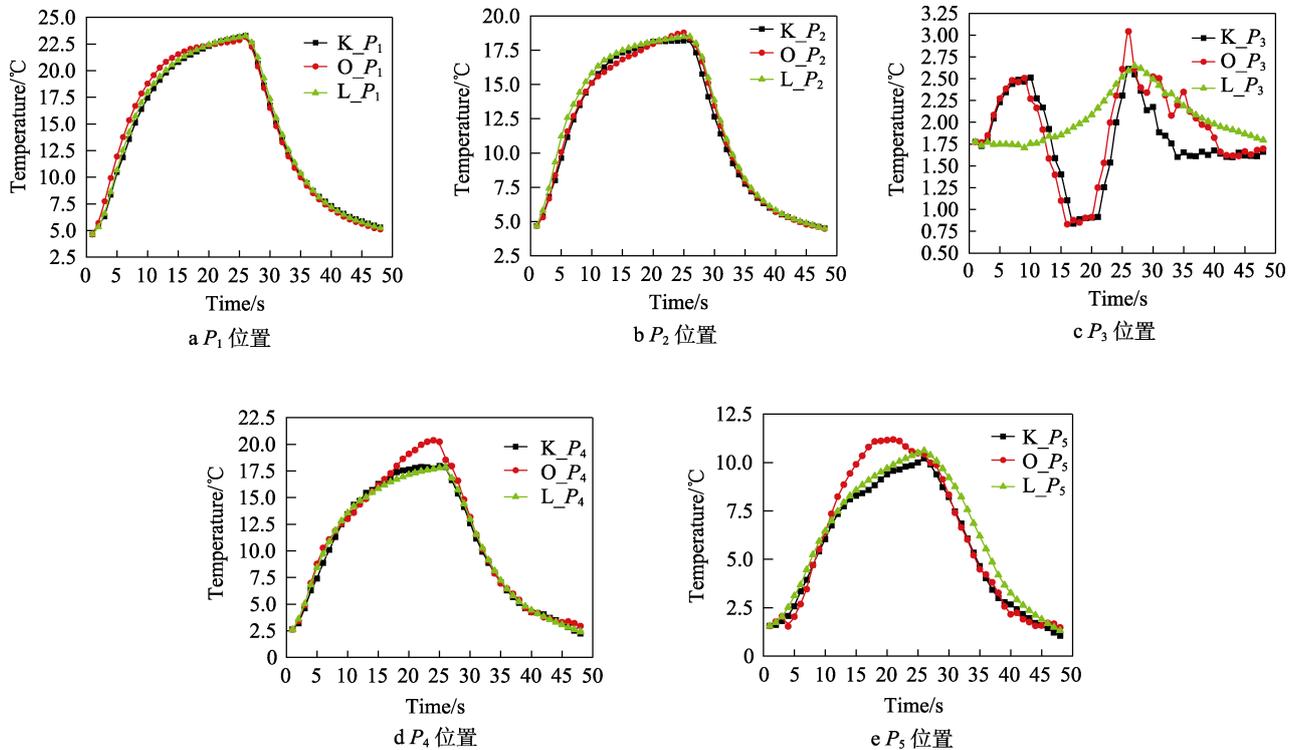


图 7 控制律通电 25 s、断电 25 s 某一样本的表面温度变化预测

Fig.7 Prediction of the change of surface temperature of a sample in the control law with power on for 25 s and power off for 25 s: a) P_1 position; b) P_2 position; c) P_3 position; d) P_4 position; e) P_5 position

由模型测温截面 5 个位置的预测温度变化曲线可知,两种算法对模型两侧 P_1 、 P_2 、 P_4 、 P_5 位置预测的温度值与测量值很接近,而图 7c 所示的 P_3 位置温度变化,为 KNN 近邻回归做的预测,更符合测量的变化趋势。为进一步比较两种回归算法的预测效果,对两种算法的预测数据分别与测量数据做皮尔逊相关系数计算,反映之间的线性相关程度。测温截面 5 个点位温度变化的相关系数及绝对误差和见表 2。

表 2 测温截面 5 个点位温度变化的相关系数及绝对误差和

Tab.2 Correlation coefficient and absolute error sum of temperature changes at 5 points of temperature measurement cross section

位置	相关系数		%
	KNN 近邻回归	局部加权线性回归	
P_1	97.85	98.58	
P_2	97.76	98.53	
P_3	80.89	38.48	
P_4	90.61	92.44	
P_5	86.98	85.06	

图 7 和表 2 的结果表明,对于截面两侧位置的预测效果,局部加权线性回归算法得到的预测值与测量值的线性相关程度较高,比 KNN 近邻回归预测效果好。对于前缘 P_3 位置,局部加权线性回归就不适用,预测值完全偏离了对应的测量值。该位置的温度变化符合通电温升、断电温降的规律,但不符合试验测量得到的温度变化趋势。KNN 近邻回归的预测结果较符合,由于 KNN 近邻回归是直接使用邻近点的特征来作预测,受表面物理变化过程影响较小,得到的相关系数计算结果为 80.98%,相关程度属于极度相关。就截面的全部测温点位而言,KNN 近邻回归算法对于整体的预测效果较好,若想获得最佳的预测效果,可针对截面位置单独地选择预测算法。同时,另需注意机器学习方法是以样本为基础,样本数据影响预测结果的精度,所以用于预测计算的样本数据,需考虑模型导热系数、温度测量手段、数据采样率等因素。

4 结论

利用结冰风洞电加热防除冰控制系统进行了周期性电加热防冰试验,并采集、存储电加热模型的试验数据。依据模型的电加热特性以及有监督学习方式,构建了表面温度变化率与供电、表面温度、环境温度的机器学习特征参数,以预测表面温度变化趋势,得到如下结论:

1) KNN 近邻回归算法适用于截面的所有测温点位,而局部线性加权回归算法对前缘位置不能作出准确的预测,但对于其他位置,比 KNN 近邻回归的预

测效果好。

2) 应用两种机器学习算法做预测计算,其结果与真实测量数据的线性相关系数达到 80%以上,表明机器学习的方法可用于预测电加热防除冰部件表面温度变化趋势。

参考文献:

- [1] 林贵平,卜雪琴,申晓斌.飞机结冰与防冰技术[M].北京:北京航空航天大学出版社,2016.
LIN Gui-ping, BU Xue-qin, SHEN Xiao-bin. Aircraft icing and anti-icing technology[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2016.
- [2] 常士楠.大型飞机的防/除冰问题[C]//大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 年学术年会论文集.深圳:中国航空学会,2007.
CHANG Shi-nan. Anti-icing/de-icing of large aircraft[C]//Proceedings of the high level forum on key technologies of large aircraft and the 2007 academic annual meeting of the Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Shenzhen: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [3] 肖春华,桂业伟,林贵平.飞机电热除冰的研究进展与展望[J].科技导报,2011,29(18):69-73.
XIAO Chun-hua, GUI Ye-wei, LIN Gui-ping. A review of studies of aircraft electrothermal de-icing[J]. Science & technology review, 2011, 29(18): 69-73.
- [4] 陶茂升,常士楠,杨诗雨,等.基于 LabVIEW 的电热防除冰温控系统设计[J].测控技术,2017,36(3):111-114.
TAO Mao-sheng, CHANG Shi-nan, YANG Shi-yu, et al. Design of electro-thermal anti-icing/de-icing temperature measurement and control system based on LabVIEW[J]. Measurement & control technology, 2017, 36(3): 111-114.
- [5] 徐磊,周建军,张大林,等.发动机进口支板防冰热负荷数值模拟[J].航空发动机,2009,35(4):21-24,16.
XU Lei, ZHOU Jian-jun, ZHANG Da-lin, et al. Numerical simulation of anti-icing heat load for strut of aeroengine inlet[J]. Aeroengine, 2009, 35(4): 21-24, 16.
- [6] POURBAGIAN M, HABASHI W G. Aero-thermal optimization of in-flight electro-thermal ice protection systems in transient de-icing mode[J]. International journal of heat and fluid flow, 2015, 54: 167-182.
- [7] 钱梦霜.石墨烯电加热除冰系统研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
QIAN Meng-shuang. Research on electro-thermal deicing system based on graphene heating film[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [8] 朱光亚.电加热防冰部件加热功率的分布特性研究[D].南京:南京航空航天大学,2014.
ZHU Guang-ya. Study on heat power distribution characteristic for aircraft anti-ice components[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.

- [9] 邹小玲. 直升机旋翼防除冰设计与分析[J]. 直升机技术, 2009(3): 39-46.
ZOU Xiao-ling. The design and analysis of helicopter rotor anti-icing/de-icing system[J]. Helicopter technique, 2009(3): 39-46.
- [10] 锁俊睿. 防除冰桨叶加热及温度控制系统设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
SUO Jun-rui. Design of heating and temperature control system on anti/de-icer paddles[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [11] POURBAGIAN M, TALGORN B, HABASHI W G, et al. Constrained problem formulations for power optimization of aircraft electro-thermal anti-icing systems[J]. Optimization and engineering, 2015, 16(4): 663-693.
- [12] 常士楠, 候雅琴, 袁修干. 周期电加热控制律对除冰表面温度的影响[J]. 航空动力学报, 2007, 22(8): 1247-1251.
CHANG Shi-nan, HOU Ya-qin, YUAN Xiu-gan. Influence of periodic electro-heating pulse on deicing surface temperature[J]. Journal of aerospace power, 2007, 22(8): 1247-1251.
- [13] 易贤, 王斌, 李伟斌, 等. 飞机结冰冰形测量方法研究进展[J]. 航空学报, 2017, 38(2): 520711.
YI Xian, WANG Bin, LI Wei-bin, et al. Research progress on ice shape measurement approaches for aircraft icing[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2017, 38(2): 520711.
- [14] 杨景朝, 蒋秀明, 董九志, 等. 基于机器学习的整体穿刺加压参数预测方法[J]. 纺织学报, 2019, 40(8): 157-163.
YANG Jing-zhao, JIANG Xiu-ming, DONG Jiu-zhi, et al. Prediction method of integrated piercing pressure parameters based on machine learning[J]. Journal of textile research, 2019, 40(8): 157-163.
- [15] 蔡洪民, 陆华成. 基于有监督学习算法的恶意程序分类识别研究[J]. 网络安全技术与应用, 2019(1): 35-36, 55.
CAI Hong-min, LU Hua-cheng. Research on malware classification and recognition based on supervised learning algorithm[J]. Network security technology & application, 2019(1): 35-36, 55.
- [16] 孙荣宗, 苗夺谦, 卫志华, 等. 基于粗糙集的快速KNN文本分类算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(24): 175-177.
SUN Rong-zong, MIAO Duo-qian, WEI Zhi-hua, et al. Fast KNN algorithm for text classification based on rough set[J]. Computer engineering, 2010, 36(24): 175-177.
- [17] 杨鹏史, 丁卉, 陈同, 等. 基于局部加权线性回归的城市公交车排放能耗预测[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2019, 58(6): 111-118.
YANG Peng-shi, DING Hui, CHEN Tong, et al. Estimation of emissions or electricity consumptions of urban buses based on Locally Weighted Linear Regression[J]. Acta scientiarum naturalium universitatis sunyatseni, 2019, 58(6): 111-118.
- [18] 郭龙, 程尧, 王梓旭. 结冰风洞试验段云雾粒径测量与控制实验研究[J]. 实验流体力学, 2018, 32(2): 55-60.
GUO Long, CHENG Yao, WANG Zi-xu. Experimental study on droplet size measurement and control of icing cloud in icing wind tunnel[J]. Journal of experiments in fluid mechanics, 2018, 32(2): 55-60.
- [19] 郭向东, 张平涛, 赵照, 等. 大型结冰风洞云雾场适航应用符合性验证[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 123879.
GUO Xiang-dong, ZHANG Ping-tao, ZHAO Zhao, et al. Airworthiness application compliance verification of cloud flowfield in large icing wind tunnel[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2020, 41(10): 123879.
- [20] 熊建军, 倪章松, 赵照, 等. 飞机模型电加热防/除冰控制系统设计与应用[C]// 第十六届中国航空测控技术年会论文集. 北京: 测控技术杂志社, 2019.
Xiong Jian-jun, Ni Zhang-song, ZHAO Zhao, et al. Design and application of anti/de-icing control system by electric heating for aircraft model[C]. Proceedings of the 16th China aviation TT & C technology annual conference. Beijing: Measurement & control technology, 2019.